

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/19062> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Hardeman, Sjoerd Reimer

Title: Non-decoupling of heavy scalars in cosmology

Date: 2012-06-08

Samenvatting

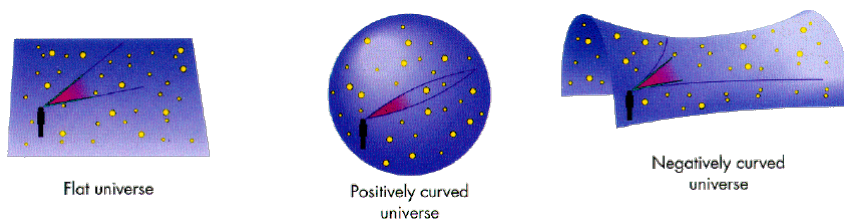
Als een systeem warmer wordt, worden meer vrijheidsgraden van een systeem toegankelijk. In ijs zijn bepaalde vibraties van het waterstofmolecuul niet beschikbaar, in vloeibaar water wel. Dit is goed zichtbaar door ijs en water in de magnetron te zetten. De magnetron zendt straling uit precies op de frequentie van zo'n vibratie en kan vloeibaar water daardoor efficiënt verwarmen. Ijs daarentegen is veel moeizamer te verwarmen in een magnetron.

In het heelal zijn er allerlei vrijheidsgraden die pas bij zeer hoge temperatuur waargenomen kunnen worden. Een paar daarvan kennen we, of denken we te kennen. Het Higgsdeeltje, waar de LHC in Genève naar zoekt, is een voorbeeld van een vrijheidsgraad die pas bij een hoge temperatuur toegankelijk is. Dat we denken te weten dat het Higgsdeeltje bestaat, komt omdat de aanwezigheid van deze vrijheidsgraad zich op lagere temperaturen verradt door correcties op bepaalde processen. Een aantal van zulke processen is nauwkeurig gemeten en de meting is alleen te verklaren als er een Higgsdeeltje is.

Echter, op hoge temperaturen zijn er waarschijnlijk vele vrijheidsgraden die we nog niet kennen. We weten nog niet welke theorie de natuur op de allerhoogste temperaturen verklaart. Wat we wel weten is dat alle tot dusver geponeerde kandidaat-theorieën gepaard gaan met vele nieuwe vrijheidsgraden. Om de theorie beter te leren begrijpen is het nodig deze nieuwe vrijheidsgraden te leren kennen. Deze vrijheidsgraden laten zich alleen zien onder bijzondere omstandigheden. Zulke omstandigheden kunnen we op aarde niet creëren, maar het heelal biedt mogelijkheden. Over wat we kunnen leren over deze vrijheidsgraden met behulp van het bestuderen van het heelal gaat dit proefschrift. Deze samenvatting beschrijft waarom het heelal zo'n goed meetinstrument is voor deze vrijheidsgraden, wat daarvan geleerd is en nog te leren valt.

Ons heelal

Volgens de meest recente waarnemingen is ons heelal is $13,7 \pm 0,4$ miljard jaar oud. Daarnaast is het heelal, op grote schaal bekeken, ruimtelijk erg vlak, isotroop en homogeen. Ruimtelijk vlak betekent dat evenwijdige lijnen altijd evenwijdig blijven. Op een gekromd oppervlak doen ze dat niet: bijvoorbeeld op een positief gekromd lichaam, zoals onze aarde, zullen evenwijdige lijnen elkaar altijd kruisen (figuur 1). Homogeen betekent dat het heelal overal ongeveer hetzelfde is. Dit geldt uiteraard niet voor kleine schalen. Een kubieke meter in het midden van een ster is duidelijk anders dan een kubieke meter vacuüm tussen de sterrenstelsels, maar de eigenschappen van een willekeurig gekozen kubus met een ribbe van 100 miljard lichtjaar¹ blijken opvallend gelijk aan de eigenschappen van elke andere willekeurig gekozen kubus. Isotroop betekent dat het heelal in alle richtingen gelijk is. Ook dit is uiteraard op kleine afstanden niet het geval, maar op dezelfde schaal van 100 miljard lichtjaar blijkt er geen richtingsvoorkeur meer te zijn.

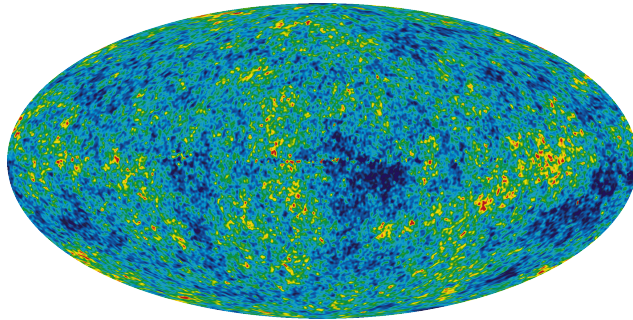


Figuur 1: *In een vlak heelal blijven evenwijdige lijnen evenwijdig. In gekromde ruimten is dit anders: in een positief gekromd heelal komen evenwijdige lijnen steeds dichterbij elkaar; in een negatief gekromd heelal wordt de afstand tussen twee evenwijdige lijnen juist steeds groter (bewerking van afbeelding van James Schombert).*

Dat ons heelal vlak, isotroop en homogeen is, is heel bijzonder. Dit laat zich goed illustreren met de eerste straling die vrij in het heelal kon reizen: de microgolfachtergrondstraling (figuur 2). Deze straling is ontstaan toen het heelal genoeg afkoelde om neutraal waterstofgas te vormen, ongeveer 380.000 jaar na de oerknal. In het vroege heelal was alle waterstof geïoniseerd, dat wil zeggen dat de positieve kern en de negatieve elektronen vrij van elkaar konden bewegen. Vrije elektronen zijn heel efficiënt in het verstrooien van licht. Alle lichtdeeltjes die in het heelal zaten werden constant verstrooid, en konden niet vrij reizen. Toen 380.000 jaar na de oerknal

¹De afstand die licht in één jaar aflegt is een lichtjaar. Dat is ongeveer 9,5 biljoen kilometer.

het heelal afkoelde tot beneden circa 3000 graden konden de elektronen zich aan de waterstofkernen binden. Waterstofatomen zijn veel minder efficiënt in het verstrooien van licht, zodat de lichtdeeltjes vanaf dat moment grotendeels onverstrooid naar onze telescopen konden reizen. Dit geeft ons een foto van de toestand van het heelal 380.000 jaar na de oerknal. Door de uitdijing van het heelal is deze straling met ongeveer een factor 1100 afgekoeld tot een temperatuur van 2,73 Kelvin (ongeveer $-270,4^{\circ}\text{C}$) nu.



Figuur 2: De microgolf-achtergrondstraling zoals gemeten door de Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP). De temperatuur van de straling is gemiddeld 2,73 K, ongeveer $-270,4^{\circ}\text{C}$. Bij de vorming van deze straling was de temperatuur nog ongeveer 3000°C , door de uitdijing van het heelal is de straling afgekoeld. De temperatuurverschillen die hier in een kleurcode zijn weergegeven zijn in de orde van een honderdduizendste graad.

Wat opvalt, zoals te zien in figuur 2, is dat de temperatuur van de straling overall ongeveer gelijk is. Dat is bepaald niet logisch: de straling die ons aan de noordpool bereikt heeft 13,7 miljard jaar lang naar ons gereisd. De straling die aan de zuidpool komt heeft een even lange reis gemaakt. De onderlinge afstand tussen de straling van de noord- en zuidpool is echter dubbel zo lang, 27,4 miljard lichtjaar. Deze punten kunnen elkaar op dit moment nog niet zien, en toch zijn ze even warm. Het is echter nog veel vreemder: we zien een plaatje van het heelal zoals het 380.000 jaar na de oerknal was, en licht kan op dat moment dan ook niet meer dan 380.000 lichtjaar afgelegd hebben. We zouden verwachten dat er geen gebieden zijn groter dan 380.000 lichtjaar, de afstand die licht gereisd kan hebben tussen de oerknal en de vorming van de microgolf-achtergrondstraling, die dezelfde temperatuur hebben. Een gebied van 380.000 lichtjaar ten tijde van de vorming van de microgolf-achtergrondstraling blijkt ongeveer één graad aan de huidige hemel te beslaan. Dat betekent aan op de

huidige hemel 40.000 gebieden zijn met een oppervlak van een vierkante graad zijn die precies dezelfde temperatuur hebben, ondanks dat ze niet met elkaar in contact stonden toen ze hun temperatuur-signaal uitzonden.

Als we beter naar het signaal kijken, blijken er gecorreleerde rimpels te zijn, zoals te zien in figuur 1.3 in de introductie. De eerste piek in dit figuur is gerelateerd aan de afstand die geluid sinds de oerknal kon reizen in het heelal, een geluidsgolf ter grootte van de geluidshorizon was precies op haar maximum. De andere pieken worden gevormd door boventonen. Echter, ook op afstanden groter dan de geluidshorizon, tot de grootte van ons zichtbare heelal, blijkt uit figuur 1.3 dat het signaal gecorreleerd is. Dit lijkt in strijd met het idee dat geen signaal meer afstand kan hebben afgelegd dan de afstand die licht kan hebben afgelegd sinds de oerknal.

Ook een vlak heelal is ongewoon. Zwaartekracht heeft de neiging materie te klonteren en zo de kromming te laten toenemen. Dat betekent dat het heelal, om nu ongeveer vlak te zijn, vroeger veel vlakker geweest moet zijn. Een vlak heelal betekent dat de bewegingsenergie van de materie precies even groot is als de zwaartekrachtsenergie die deze materie bij elkaar houdt. Om het heelal nu zo vlak te krijgen als is waargenomen, moet de afstemming tussen bewegings- en zwaartekrachtsenergie vroeger extreem precies geweest zijn. Zo moet ten tijde van de vorming van de achtergrondstraling het verschil kleiner dan vier miljoenste procent zijn geweest, 10^{-35} seconde na de oerknal (in de volgende paragraaf wordt duidelijk wat er op dit tijdstip gebeurde) was dit verschil zelfs kleiner dan 1 op 10^{-27} . Ter illustratie: als met deze precisie een raket naar de dichtstbijzijnde ster² wordt gestuurd zou de raket bij die ster op de schaal van ongeveer één atoom, een tien-miljardste meter, nauwkeurig aankomen.

Kort samengevat is het heelal erg gevoelig voor de beginparameters. Om het heelal te krijgen zoals het nu is vergt een zeer precieze instelling van deze parameters. Dit heet finetuning, veel finetuning wordt over het algemeen gezien als een probleem. Ons heelal heeft veel finetuning nodig, tenzij een fysisch mechanisme gevonden wordt om deze finetuning automatisch te laten plaatsvinden. Dit mechanisme is gevonden: inflatie.

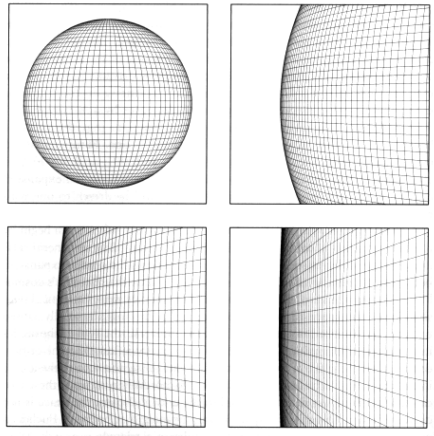
Inflatie

In 1980 is door Alan Guth het idee geopperd dat het heelal vlak na de oerknal exponentieel snel is uitgedijd, inflatie. Deze zeer snelle uitdijning blijkt de finetuning-

²De dichtstbijzijnde ster is natuurlijk de zon. Ik bedoel hier echter Proxima Centauri, op een afstand van 4,2 lichtjaar.

problemen zoals in de vorige paragraaf beschreven te kunnen oplossen. Inflatie wordt veroorzaakt doordat de vacuümenergie van het heelal positief is. Als je Einstein's vergelijkingen oplost met een vacuümenergieterm, blijkt dat te leiden tot een exponentieel versnelde uitdijning.³ En dat heeft vele gevolgen.

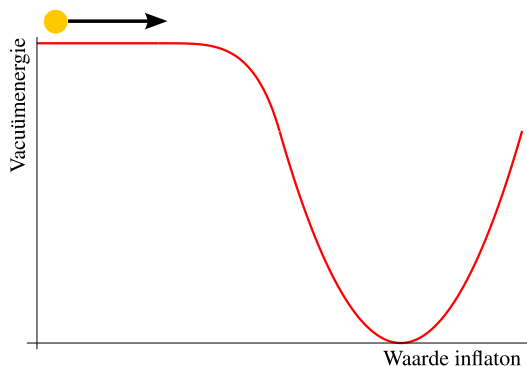
Een eerste gevolg van inflatie is dat de afstand tussen twee punten sneller groeit dan de afstand die licht kan reizen. Dit is geïllustreerd in figuur 1.2(a) in de introductie. Dit maakt het mogelijk dat het hele huidige zichtbare heelal vóór inflatie een zo klein gebied besloeg, dat licht wel de tijd had om van de ene naar de andere kant in dit gebiedje te reizen. Zo kon vóór inflatie dit gebiedje in thermisch evenwicht raken en kunnen we verklaren waarom de temperatuur van de microgolf-achtergrondstraling overal ongeveer hetzelfde is. Immers, de hele zichtbare achtergrond is ooit in thermisch contact geweest.



Figuur 3: In een exponentieel versneld uitdijend heelal wordt de kromming steeds kleiner (afbeelding van Margaret Hanson).

Een tweede gevolg van inflatie is dat het heelal vlakker wordt, dat de bewegings- en zwaartekrachtsenergie steeds gelijkjer worden. De zwaartekrachtsvergelijking heeft

³Einstein gebruikte deze waarneming om een kosmologische constante toe te voegen, waarbij deze versnellingsterm precies de door de zwaartekracht van de materie veroorzaakte vertraging moest opheffen, zodat een stabiel heelal mogelijk werd. Later werd dit idee door hem zijn "grootste blunder uit mijn carrière" genoemd, nadat Willem de Sitter had aangetoond dat met dit idee geen stabiel heelal beschreven kan worden. Enige jaren later, in 1929, toonden waarnemingen van Edward Hubble aan dat het heelal niet statisch is, maar uitdijt. Echter, hoewel deze door Einstein voorgestelde term niet voldoet om een statisch heelal te maken, voldoet hij wel om een exponentieel snel uitdijend heelal te beschrijven.



Figuur 4: *Inflatie wordt veroorzaakt door een veld dat gedurende een bepaalde tijd een grote vacuümenergie genereert. Inflatie wordt beëindigd doordat het veld ophoudt deze vacuümenergie te genereren, en deze energie uiteindelijk terechtkomt in de materie waaruit het huidige heelal bestaat.*

normaal als oplossing dat de kromming van een gekromd object groter wordt, in een exponentieel uitdijend heelal draait dit om en wordt de kromming juist steeds kleiner (figuur 3). Zo zal genoeg inflatie een erg vlak heelal opleveren, of de bewegings- en zwaartekrachtsenergie erg gelijk maken, gelijkertijd dan de vereiste maximale afwijking van 1 op 10^{-27} .

Een derde gevolg van inflatie, het gevolg waarvan in dit proefschrift veelvuldig gebruik wordt gemaakt, is dat inflatie ook de rimpels voorspelt. Deze rimpels zullen na inflatie als geluidsgolven door het heelal reizen en de waargenomen gecorreleerde rimpels in de microgolf-achtergrondstraling maken (figuur 2 en 1.3). Om het ontstaan van de rimpels te begrijpen is het nodig in meer detail naar het mechanisme dat inflatie veroorzaakt te kijken.

Zoals beschreven leidt een vacuümenergie tot een exponentieel versnelde uitdijning van het heelal. Wat we nodig hebben is een mechanisme om zo'n vacuümenergie voor een bepaalde tijd te genereren. Als dit mechanisme eindigt zal de vacuümenergie vervallen in de materie waar wij van gemaakt zijn, en zal inflatie eindigen. Om dit te bereiken is een veld nodig dat een vacuümenergie genereert als het niet in de toestand van minste energie zit. Verder moet er wel langzaam een ontwikkeling naar de toestand van minimale energie plaatsvinden. Dit kan door een veld te kiezen dat langdurig niet in de toestand van minimale energie zit, zoals in figuur 4 is weergegeven. Het veld bevindt zich tijdens inflatie op het vlakke stuk met grote vacuümenergie,

om aan het einde van inflatie naar het nulpunt te vallen.

Het veld dat nodig is om inflatie te genereren heet het inflaton. Dit veld ontwikkelt zich langzaam en daarbij zal het zich volgens de wetten van de quantummechanica gedragen. Een van de belangrijkste eigenschappen van de quantummechanica is dat alles een beetje onzeker is. Dat betekent dat ook de waarde van het veld niet helemaal zeker is en dus van plaats tot plaats een klein beetje anders zal zijn. Dit zorgt voor quantumrimpels, die vervolgens door de snelle uitdijning van het heelal kunnen worden opgeblazen tot de grootte van ons zichtbare heelal en daarmee de rimpels in de microgolf-achtergrondstraling veroorzaken.

Om dit hele mechanisme te laten werken is het nodig dat het heelal in hele, hele korte tijd heel, heel veel groter wordt. Om precies te zijn, in zo'n 10^{-35} seconde moet het heelal minimaal 10^{24} keer zo groot worden. Als dit proefschrift met een vergelijkbare factor vergroot zou worden, zou het boekje de grootte van het zichtbare heelal krijgen. Zo'n extreme uitdijning stelt eisen aan het veld dat inflatie veroorzaakt. De vacuümenergie moet, ondanks dat het heelal zo snel uitdijt, erg constant blijven, zodat de gevormde rimpels overeenkomen met de waarnemingen van deze rimpels in de microgolf-achtergrondstraling. Deze eis wordt "slow-roll"-inflatie genoemd. Het blijkt verrassend eenvoudig om een vergelijking voor één enkel veld op te schrijven zodanig dat het voldoet aan de eis van "slow-roll" en rimpels voorspelt die overeenkomen met de waarnemingen. Echter, in ons heelal zit veel meer dan één veld.

Hoge-energiefysica van inflatie

De fysica van de deeltjes waarvan wij gemaakt zijn, elektronen en quarks,⁴ evenals de krachten die deze deeltjes beïnvloeden⁵ wordt beschreven met deeltjes en velden. Op lage temperatuur zijn er dan ook al een heleboel velden. Als de temperatuur opgevoerd wordt, wordt de situatie niet beter. Dit omdat bij hogere temperatuur juist meer in plaats van minder vrijheidsgraden beschikbaar komen.

Op dit moment is er nog geen theorie om zowel de fysica op de kleinste schalen, het niveau van elektronen en quarks, als op de grootste schalen, het niveau van sterrenstelsels en het heelal, te beschrijven. Op de kleinste schalen zijn de quantumtheorieën voor elektromagnetisme, de zwakke kracht en de sterke kracht erg goed beschreven door het standaardmodel. Op de grootste schalen is alleen zwaartekracht

⁴Quarks zijn de deeltjes waarvan protonen en neutronen gemaakt zijn. Protonen en neutronen vormen de bouwstenen van atoomkernen, welke samen met elektronen de atomen vormen.

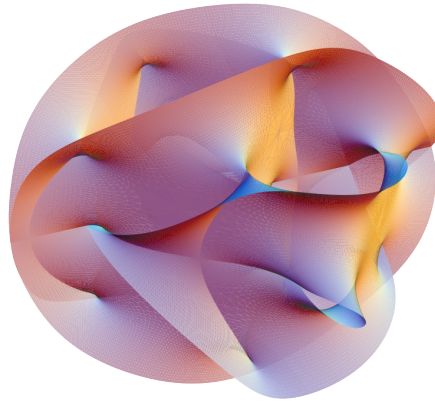
⁵Elektromagnetisme, de sterke kracht die ervoor zorgt dat atoomkernen bijeen blijven en de zwakke kracht welke zorgt voor radioactiviteit.

relevant, welke nauwkeurig beschreven wordt door Einstein's algemene relativiteitstheorie, waarvan geen quantumbeschrijving bestaat. Doordat nog niet bekend is hoe zwaartekracht met quantummechanica gecombineerd moet worden is er nog geen beschrijving van de zwaartekracht op de schaal van het standaardmodel.

Wel zijn er een aantal voorstellen voor een theorie die tegelijkertijd het standaardmodel en de algemene relativiteitstheorie moet beschrijven. De belangrijkste kandidaat is de snaartheorie. In deze theorie wordt als fundamentele bouwsteen geen puntdeeltje, maar een heel klein snaartje gebruikt. Dit maakt het mogelijk om de problemen met zwaartekracht op de kleinste schalen te omzeilen. Snaartheorie blijkt in drie dimensies niet goed te werken. De problemen met snaartheorie zijn echter op te lossen in een ruimte met negen dimensies.⁶ Dit is uiteraard in tegenstelling met de waarnemingen van onze overduidelijk driedimensionale wereld. Onze waarnemingen zijn echter beperkt tot schalen die we daadwerkelijk kunnen zien. We weten dat het heelal drie grote ruimtelijke dimensies heeft, maar het is best mogelijk dat er ook nog een aantal kleine ruimtelijke dimensies zijn. Vergelijk dit met een lang touw: van dichtbij is een touw duidelijk driedimensionaal, met een lengte langs het touw en een dikte in de tweedimensionale doorsnede. Als het touw van veraf bekeken wordt, is de dikte echter niet meer te zien. Ook voor de fysica van het touw kunnen de "kleine dimensies" onbelangrijk worden. Als je golven in het touw maakt, maakt de dikte van het touw niet zoveel uit. Samen met het soort touw bepaalt de dikte de stijfheid, maar verder is voor het beschrijven van de golf alleen een coördinaat in de lengte van het touw nodig. Pas bij korte golven wordt het mogelijk dat het touw ook in de breedte gaat bewegen waardoor de "kleine dimensies" zichtbaar worden.

Om van de negen ruimtelijke dimensies van snaartheorie naar de drie ruimtelijke dimensies van onze wereld te komen, is een methode nodig om zes dimensies heel klein te maken, "compactificatie". Om dit voor elkaar te krijgen wordt aangenomen dat de negendimensionale ruimte bestaat uit een driedimensionale ruimte met op elk punt een piepkleine zesdimensionale ruimte (figuur 5). De groottes en vormen van deze zesdimensionale ruimte liggen niet vast, maar kunnen variëren. Dit levert extra vrijheidsgraden op, die in onze driedimensionale wereld zichtbaar zijn als zogeheten scalaire velden. Deze scalaire velden zijn tot dusver nog niet gevonden, wat betekent dat de groottes en vormen van deze zesdimensionale ruimte erg stabiel moeten zijn. Dit is niet de natuurlijke toestand, een probleem waarvoor pas in het begin van deze eeuw een eerste deeloplossing is gepresenteerd. Er is ontdekt dat deze zesdimensionale ruimte klein gehouden kan worden door equivalenten van elektromagnetische velden en ladingen toe te voegen, omdat het energie kost om van een ruimte met een

⁶Meestal wordt de snaartheorie tiendimensionaal genoemd. Dit zijn de negen ruimtelijke dimensies plus tijd.



Figuur 5: Een projectie van een zesdimensionale ruimte van het soort dat gebruikt wordt voor compactificatie. De vele vormen en volumes van zowel de gehele ruimte alsmede de “gaten” vormen vrijheidsgraden (afbeelding van Andrew Hanson).

elektromagnetisch veld de vorm of het volume te veranderen.

Een van de bekendste mechanismen om dit voor elkaar te krijgen is het mechanisme van Kachru, Kallosh, Linde en Trivedi (KKLT) uit 2003. Bezwaar op het KKLT-mechanisme is dat de oplossing in meerdere stappen uitgevoerd wordt, waarbij bij iedere stap ervan uitgegaan wordt dat de volgende stap onafhankelijk is van eerdere stappen. In hoofdstuk 2 hebben wij laten zien dat dit over het algemeen niet het geval is en dat grote correcties op het KKLT-mechanisme te verwachten zijn. Een ander mechanisme om vorm en volume van de zesdimensionale ruimte vast te leggen is het zogeheten grote-volume scenario.⁷ Dit scenario gaat uit van eenzelfde stappenplan als het KKLT-mechanisme om uiteindelijk alle vormen en het volume stabiel te maken. Echter, in dit model blijken de correctietermen veel kleiner te zijn, doordat deze correctietermen kleiner worden als het volume groter wordt.

In hoofdstuk 3 bekijken we een model in de superzwaartekracht-theorie en bestuderen we hoe in superzwaartekracht een vacuümenergieterm kan worden toegevoegd. Superzwaartekracht kan gebruikt worden om op lage energieën snaartheorie te beschrijven. Een van de problemen van snaartheorie en superzwaartekracht is dat ze een

⁷Groot volume betekent hier groot ten opzichte van de grootte van de snaren, die ongeveer 10^{-33} meter groot zijn. Voor onze begrippen is dit grote volume echter nog heel erg klein, van de orde van 10^{-23} meter, te klein om met de LHC in Genève te detecteren.

ruimte beschrijven met een negatieve vacuümenergie. Voor inflatie hebben we echter een positieve energie nodig, in het huidige heelal moet de vacuümenergie vrijwel nul zijn.⁸ Om dit voor elkaar te krijgen is een “uplifting”-term nodig. Een probleem van een “uplifting”-term is echter dat heel vaak de theorie instabiel wordt als een “uplifting”-term wordt toegevoegd. Wij hebben laten zien dat het mechanisme dat stabiele theorieën instabiel maakt een bepaalde klasse van instabiele theorieën juist stabiel kan maken na “uplifting”.

In de laatste twee hoofdstukken, hoofdstukken 4 en 5, kijken we naar mogelijkheden om de eigenschappen van de extra kleine dimensies te achterhalen. We doen dit in de specifieke context van inflatie, omdat deze correctietermen hier de grootste rol spelen. Intuïtief is het logisch: als drie dimensies 10^{24} keer zo groot worden, waarom doen de overige zes dimensies dan niet mee? Zoals beargumenteerd in hoofdstuk 2 is het niet eenvoudig de kleine dimensies klein te houden. Mechanismen die deze dimensies wel klein houden hebben meestal correctietermen nodig. Deze correctietermen kunnen een grote rol spelen tijdens inflatie. Dat kan doordat deze termen correcties geven op de waarde van het inflatonveld dat inflatie veroorzaakt, zodat feitelijk inflatie niet beschreven wordt door één veld maar door meerdere. In het geval meerdere van deze velden ongeveer even zwaar zijn en daardoor makkelijk kunnen bijdragen aan inflatie, is sprake van meervelden-inflatie. Deze vorm van inflatie wordt door veel mensen uitgebreid bestudeerd en levert interessante manieren op om de theorie te testen met behulp van waarnemingen van ons heelal.

Wij hebben laten zien dat zelfs als de velden die het inflatonveld beïnvloeden veel zwaarder zijn, ze ook effecten opleveren. De algemene aanname is dat de bijdrage van zulke zware toestanden sterk onderdrukt is. Echter, in het geval van inflatie kunnen deze toestanden in belangrijke mate het traject bepalen waarlangs de waarde van het inflatonveld zich ontwikkelt. Dit kan ervoor zorgen dat dit traject bochten maakt (omslag en figuur 4.1). Zulke bochten blijken in potentie waarneembare signalen in de microgolf-achtergrondstraling achter te laten. Dit biedt de mogelijkheid om met de studie van de microgolf-achtergrondstraling ook de fysica van zulke zware toestanden te achterhalen. Dit is een van de belangrijkste resultaten van dit proefschrift.

⁸Recente waarnemingen laten zien dat ook in het huidige heelal de vacuümenergie positief is, omdat ons heelal inmiddels weer versneld uitdijt. Deze energieterm is echter wel veel en veel kleiner dan de vacuümenergie tijdens inflatie.